

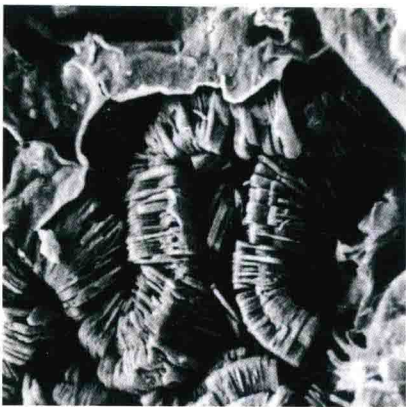


黏土矿物

与油气勘探开发

◎ 赵杏媛 何东博 著

石油工业出版社



CLAY MINERAL AND
APPLICATION IN OIL
AND GAS EXPLORATION
AND DEVELOPMENT

黏土矿物与油气勘探开发

赵杏媛 何东博 著

石油工业出版社

内 容 提 要

本书在全面阐述黏土矿物样品选取、前处理、分析鉴定、中国含油气盆地黏土矿物学特征、分布规律及其形成机理基础上,深入论述了黏土矿物在研究古环境、地层划分与对比、成岩阶段划分、油气生成与运移、页岩气等方面的应用,并论述了常见油气层损害问题及其保护措施。

可供石油地质、石油工程专业以及黏土矿物学相关领域的科技人员参阅,也可用作相关院校师生的教材或参考书。

图书在版编目(CIP)数据

黏土矿物与油气勘探开发/赵杏媛,何东博著.

北京:石油工业出版社,2016.2

ISBN 978-7-5183-0360-1

I. 黏…

II. ①赵… ②何…

III. ①黏土矿物-关系-油气勘探 ②黏土矿物-关系-油田开发

IV. ①P578 ②P618.130.8-53 ③TE34-53

中国版本图书馆CIP数据核字(2014)第199217号

出版发行:石油工业出版社

(北京安定门外安华里2区1号 100011)

网 址:www.petropub.com

编辑部:(010)64523689 图书营销中心:(010)64523633

经 销:全国新华书店

印 刷:北京中石油彩色印刷有限责任公司

2016年2月第1版 2016年2月第1次印刷

787×1092毫米 开本:1/16 印张:27

字数:620千字

定价:65.00元

(如出现印装质量问题,我社图书营销中心负责调换)

版权所有,翻印必究

前 言

20 世纪 20 年代以前,黏土科学处于萌芽阶段;20 世纪 20—50 年代,随着 X 射线衍射等先进测试仪器和技术引入黏土矿物学研究领域,使黏土和黏土矿物研究走上了科学发展的道路,进入研究资料的积累阶段;20 世纪 50—60 年代,系统地建立了黏土矿物学的理论体系和研究手段。随着社会对能源需求量的不断增加,石油工业的发展极大地促进了黏土矿物学研究领域的发展。1949—1950 年克尔(Kerr)主持编写的《粘土矿物基准》是第一份综合性文献。1953 年格里姆(Grim)出版了第一本专著《粘土矿物学》;同年,须藤俊男也出版了一本《粘土矿物学》。

我国是一个黏土矿产和黏土岩分布广泛、资源丰富、种类繁多的国家,有悠久的黏土应用史,例如江西省景德镇的陶瓷,现在国际通用的“Kaolin(高岭)”一词就是据我国产地景德镇高岭山而得名。我国石油系统的黏土矿物研究自 20 世纪 60 年代以来得到了不断发展。特别是 20 世纪 70 年代以来,各大油气田研究院先后建立了黏土矿物实验室,开展有关黏土矿物多种课题的研究,其研究和应用领域不断扩大,并取得了显著成果。自 20 世纪 60 年代以来国内学者发表了与油气有关的黏土研究论文百篇以上和近二十部专著。

黏土和黏土矿物约占岩石总量的一半,是泥页岩中的主要成分,也是砂岩中的重要胶结物和部分骨架颗粒,在火山岩、变质岩和碳酸盐岩中均含有黏土矿物成分,也就是说,地层中处处存在黏土矿物。黏土矿物是自然界颗粒最细小的一类矿物,直径多小于 $2\mu\text{m}$,有晶质和非晶质两类。黏土矿物比表面积大,在表面电荷、阳离子交换、吸附有机质、水化膨胀及环境敏感性等方面具备特有的性质。由于黏土矿物分布的广泛性和独特的晶体结构、物理化学性质,使其与油气地质研究、油气田开发和钻采工程等方面有着密切的关系。

在油气地质领域内,黏土矿物的研究成果在用于恢复沉积盆地古气候、古水介质性质、追索物源区和进行地层划分和对比(尤其哑地层)等方面都取得了良好的效果;黏土矿物的成岩演变与油气生成和运移的关系研究,已经成为现代油气成因理论的重要组成部分;黏土矿物的种类、含量、形态、产状等特征直接与砂岩储层物性相关,是正确评价油气储层的重要参数;黏土矿物的种类、含量等特征与泥岩盖层质量关系密切,可以用于油气泥岩盖层的研究;黏土矿物与页岩气形成也有密切关系,值得进一步的研究。

在油气钻井工程和油气田开发领域中,特别是 20 世纪 70 年代以来,有关黏

土矿物与油气层损害及其防护措施的研究,愈来愈引起人们的关注。从钻井到采油,甚至到三次采油的每个施工环节中所使用的工作液如与黏土矿物发生反应,可使黏土矿物产生膨胀、细粒迁移、化学沉淀以及与其相关的非黏土矿物的不稳定变化,从而造成油气层损害和井壁坍塌。黏土矿物是油气层损害和井壁坍塌最重要的潜在因素。1974年美国石油工程师学会召开了第一届控制地层损害的专题讨论会,把防止地层损害问题正式列入议事日程。根据 Maly(1974)的研究,在美国,一个油田在被迫放弃之前,一般只采出其储量的31%,剩下69%的石油仍留在地下。解决这个问题的办法就是减少和防止油气层损害,这是最直接和最有希望提高采收率的途径之一。目前,黏土矿物与油气层保护已经成为油气钻采领域中的重要研究课题,具有广阔的发展前景。

长期以来,黏土矿物分析研究和应用具有如下特点:①分析手段从单一到多种,从简单分析方法到利用高科学技术,但每种方法都存在一定的局限性和多解性,因此多种分析成果综合解释是得到准确结果的有效途径;②研究目标从矿床(单一矿物)到地层(几种矿物以组合形式存在);③研究样品从现代沉积到成岩后的岩石中的黏土矿物;④研究成果从工业应用到石油勘探开发中的应用。

近50年来,笔者对我国30多个主要含油气盆地不同层系的20多万块样品进行了黏土矿物分析和有关项目的研究,积累了丰富的基础资料和研究成果,本书就是这些资料和成果的集中体现。

在本书编写过程中得到了陈涛涛、张有瑜和朱德升等的大力帮助,在此表示诚挚的谢意。

笔者
2013年1月

目 录

第一章 黏土矿物学基础	(1)
第一节 黏土矿物的概念和基本结构	(1)
第二节 黏土矿物的分类与名称	(6)
第三节 主要黏土矿物的结构特征	(11)
第四节 黏土矿物的性质	(22)
第二章 黏土矿物分析方法	(39)
第一节 样品选取与前处理	(39)
第二节 黏土矿物 X 射线衍射分析	(46)
第三节 黏土矿物热分析	(64)
第四节 黏土矿物红外光谱分析	(66)
第五节 黏土矿物扫描电镜、能谱和电子探针分析	(69)
第六节 黏土矿物分析方法综述	(73)
第三章 中国含油气盆地黏土矿物的矿物学特征	(77)
第一节 高岭石—蛇纹石族	(77)
第二节 叶蜡石—滑石族	(90)
第三节 绿泥石族	(92)
第四节 云母(挠性的)族	(107)
第五节 蒙皂石族	(119)
第六节 间层黏土矿物	(131)
第七节 坡缕石矿物	(165)
第四章 中国含油气盆地黏土矿物分布规律及其控制因素	(171)
第一节 中国含油气盆地黏土矿物分布模式	(171)
第二节 中国含油气盆地黏土矿物的控制因素	(202)
第五章 黏土矿物研究在油气地质勘探中的应用	(239)
第一节 黏土矿物在推断古环境中的应用	(239)
第二节 黏土矿物在地层划分和对比中的应用	(254)
第三节 黏土矿物在成岩作用、油气生成和运移中的应用	(270)
第四节 黏土矿物与储层物性	(280)
第五节 黏土矿物对地球物理测井解释的影响	(305)
第六节 黏土矿物与油气成藏时代	(309)
第七节 黏土矿物与页岩气	(314)
第八节 黏土矿物在其他方面的应用	(316)

第六章 黏土矿物与油气储层损害	(323)
第一节 储层损害及其研究方法	(323)
第二节 黏土矿物对储层损害的潜在影响	(328)
第三节 储层损害机理及保护措施	(334)
图版	(363)
图版说明	(399)
参考文献	(413)

第一章 黏土矿物学基础

第一节 黏土矿物的概念和基本结构

一、黏土矿物的概念

(一) 黏土矿物

黏土矿物是细分散的、含水的层状构造硅酸盐矿物、层链状构造硅酸盐矿物以及含水的非晶质硅酸盐矿物的总称。通常见到的黏土矿物主要是层状构造硅酸盐矿物,只有少数为层链状构造硅酸盐矿物。

(二) 晶质与非晶质

所有晶体内部的质点(原子、离子或分子)都作规律排列,这种规律主要表现为同种质点的周期性重复,从而构成了所谓格子构造。凡是质点作规律排列,即具有格子构造的物质称为结晶质(晶质);内部质点不作规律排列,即不具有格子构造的物质称为非结晶质(非晶质)。通常黏土矿物定性定量分析成果表和报告中的黏土矿物均指晶质黏土矿物。

非晶质黏土矿物在自然界,特别是在土壤和时代新的沉积物中,可能有更广泛的分布,它们往往与晶质黏土矿物共存。随着时间的推移,土壤和新形成的沉积物中,一些非晶质黏土矿物会晶化成晶质黏土矿物(杨雅秀等,1994)。

(三) 黏土和黏土岩

关于“黏土”这一术语的含义,各学科理解不尽相同,地质学家强调颗粒大小;工程学家强调黏土的可塑性;而陶瓷学家则强调黏土的烧结性。一般来说,地质科学中的黏土具有两方面的含义:黏土是一个岩石学术语,又是一个粒度术语。

1. 岩石学术语

黏土是黏土矿物的集合体。在沉积岩石学中,黏土指的是疏松的尚未固结成岩的以黏土矿物为主的沉积物,经过成岩作用以后就变为“黏土岩”。换句话说,把松散的具有可塑性的称为“黏土”,而把坚硬的无可塑性的称为“黏土岩”。黏土岩或黏土中黏土矿物含量高于50%。与黏土岩相近的岩石学术语还有泥岩、页岩、板岩和泥板岩等。

2. 粒度术语

黏土指的是粒度分析中最细粒部分,也即黏土级部分。黏土级上限一般采用 $2\mu\text{m}$,也常有采用 $5\mu\text{m}$ 或 $4\mu\text{m}$ 者,甚至也有 $1\mu\text{m}$ 或 $10\mu\text{m}$ 者,各学科不尽一致。

二、黏土矿物的基本结构

(一) 基本结构单元

1. 硅氧四面体与四面体片

1) 硅氧四面体

硅氧配位四面体(SiO_4^{4-})(符号为T)是硅酸盐矿物最稳定的基本结构单元。硅氧四面体

是由一个 Si^{4+} 离子等距离地配上四个比它大得多的 O^{2-} 离子构成的(图 1-1-1a)。每个硅氧四面体中有三个氧位于同一平面上,另外一个氧搁在顶端。位于同一平面上的三个氧称为“底氧”或“底面氧”,位于顶端的氧称为“顶氧”。硅氧四面体的四个氧各带一个负电荷。

2) 四面体片

层状构造硅酸盐以硅氧四面体联结成片为特征。在层状构造中,所有的硅氧四面体都分布在一个平面内,每个四面体底部的三个氧(底氧)分别与相邻的三个硅氧四面体共用,在二维平面上连成无限延展的硅氧四面体片(图 1-1-1b),一个四面体片中所有的未共用顶氧都指向同一个方向。硅氧四面体片平面上呈六方网格状(图 1-1-1c),其分子式为 $[\text{Si}_4\text{O}_{10}]^{4-}$ 。由于四面体片含有负电荷,所以,在实际矿物结构中,四面体片仅能以与阳离子和附加氧离子结合的形式存在。四面体配位位置只适应那些体积较小的阳离子,这些阳离子主要是 Si^{4+} ,其次是 Al^{3+} ,很少为 Fe^{3+} 。占据四面体配位位置的阳离子称为四面体阳离子。

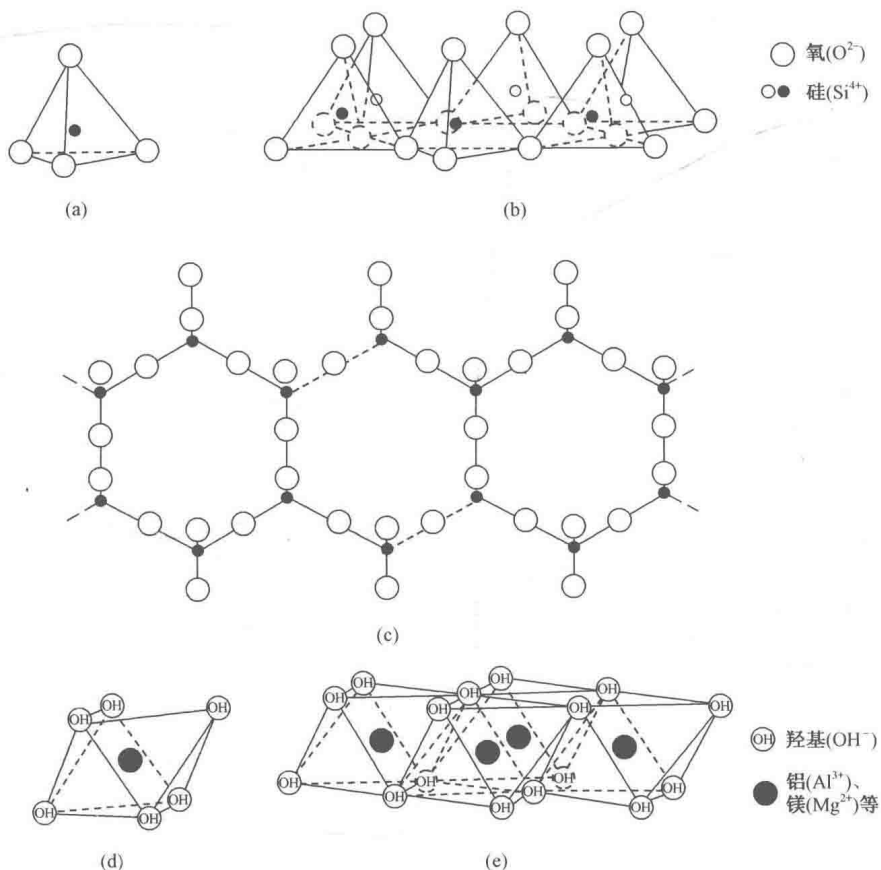


图 1-1-1 黏土矿物的基本结构单元(据 Grim,1953)

(a) 单独的硅氧四面体;(b) 呈六边形网格状排列的硅氧四面体——四面体片;
(c) b 图的底面投影图;(d) 单独的八面体;(e) 八面体片

2. 八面体与八面体片

在层状构造中,四面体片总是以某种方式与八面体片联结。八面体是由两层氧离子或氢氧离子紧密堆积而成,大阳离子位于其中,呈八面体配位(图 1-1-1d 和 e)。这种构型适应像 Al^{3+} 、 Mg^{2+} 、 Fe^{2+} 和 Fe^{3+} 等较大阳离子配位,但不适应像 Ca^{2+} 、 Na^+ 或 K^+ 等更大阳离子配位。占据八面体配位位置的阳离子称为八面体阳离子。八面体片含有两个六边形氧或氢氧面。如果把两个面的第一个面(下层氧或氢氧面)形象化的表示,就会发现,每三个球内就有一个是虚线或空心的(图 1-1-1e),这个位置可以交替地被阳离子或上层面的氧(或氢氧)所占据。八面体中,连结 6 个最近氧或氢氧的棱形成一个具有八个面的几何整体,也即八面体(图 1-1-1d)。在八面体片中,八面体各自以它的一个面摆置成一个平面,即八面体片(图 1-1-1e)。

3. 三八面体与二八面体

与四面体不同,八面体能独立存在,水镁石 $[\text{Mg}_3(\text{OH})_6]$ 和三水铝石 $[\text{Al}_2(\text{OH})_6]$ 就是全部由八面体片组成的矿物。水镁石是三八面体结构(3/3 占位)矿物,三水铝石是二八面体结构(2/3 占位)矿物。显然,三八面体就是八面体阳离子配位位置全部被阳离子(Mg^{2+} , Fe^{2+} 等)充填,二八面体就是八面体阳离子配位位置只有三分之二被阳离子(Al^{3+} , Fe^{3+} 等)充填。

(二) 基本结构层

四面体片与八面体片的相互结合构成了层状构造硅酸盐矿物的基本结构层。按照四面体片与八面体片配合比例,可以把层状构造硅酸盐矿物的基本结构层分为 1:1 层型和 2:1 层型两个基本类型。高岭石是 1:1 层型矿物的典型代表,白云母是 2:1 层型矿物的典型代表。

1. 1:1 层型

由一个八面体片和一个四面体片结合而成的 1:1 层型是层状构造硅酸盐矿物最简单的结晶构造(图 1-1-2)。1:1 层型可以是二八面体的,也可以是三八面体的。

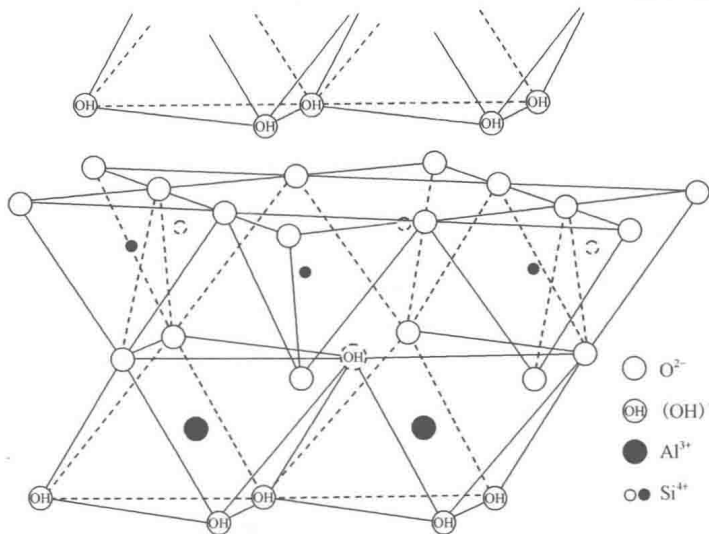


图 1-1-2 高岭石的结晶构造——1:1 层型二八面体层状构造硅酸盐(据 Grim, 1953)

2. 2:1层型

层状构造硅酸盐矿物的另外一个基本层型就是由两个四面体片和一个八面体片组成的2:1层型(图1-1-3)。从图1-1-3可以看出,2:1层型与1:1层型类似,只不过是另外一个四面体片的方位与第一个四面体片的方位正好相反。2:1层型可以是二八面体的,也可以是三八面体的。图1-1-3是白云母的结晶构造,它是一种2:1层型的二八面体层状构造硅酸盐矿物。

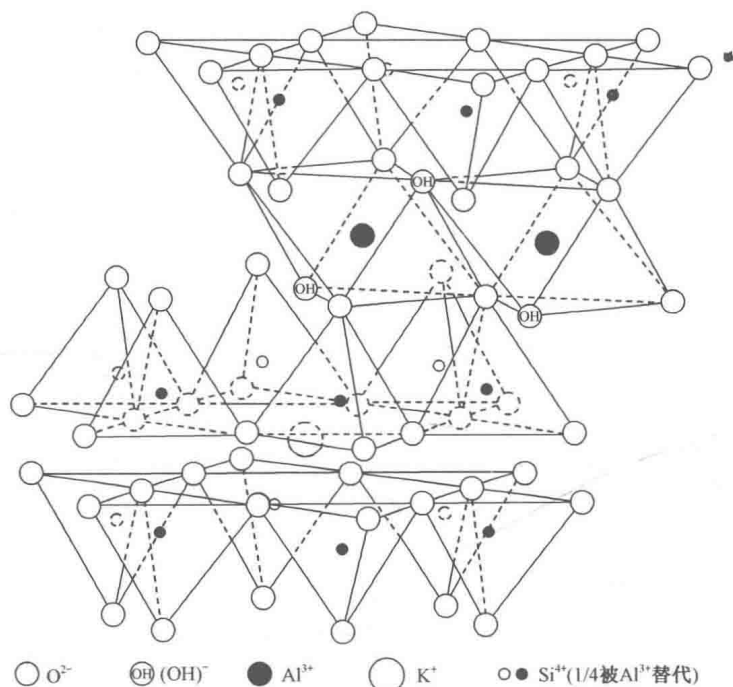


图1-1-3 白云母的结晶构造——2:1层型二八面体层状构造硅酸盐(据 Grim,1953)

(三)层间域、层间物、层电荷和单位构造

层状构造硅酸盐黏土矿物是由基本结构层(1:1层型或2:1层型)重复堆叠而成的。当两个基本结构层重复堆叠时,相邻基本结构层之间的空间称为层间域,常用的代号为I(图1-1-4)。层间域中可以有物质存在,也可以没有物质存在。存在于层间域中的物质称为层间物。层间物可以是水(如埃洛石)、水和交换性阳离子(如蒙皂石和蛭石),也可以是阳离子(如云母类矿物)。值得注意的是绿泥石矿物,在它的层间域中存在一层氢氧化物八面体片(图1-1-5)。

基本结构层与层间域组成的层状体称为单位构造。单位构造的高度用 d_0 表示(图1-1-4,图1-1-5)。如果忽略边缘破键,单独的1:1层型或2:1层型可以是电中性的,也可以是带有负电荷的。如果是带有负电荷,所带的负电荷被层间域内的层间物平衡。层间域中平衡1:1层型或2:1层型的负电荷的阳离子称层间阳离子。理想的1:1层型或2:1层型都是电中性的,层电荷是四面体片或八面体片中的阳离子替代的结果,显然,层电荷受四面体片或八面体片中的阳离子替代控制。四面体片中阳离子替代所产生的层电荷称为四面体电荷,八面体片中阳离子替代所产生的层电荷称为八面体电荷。

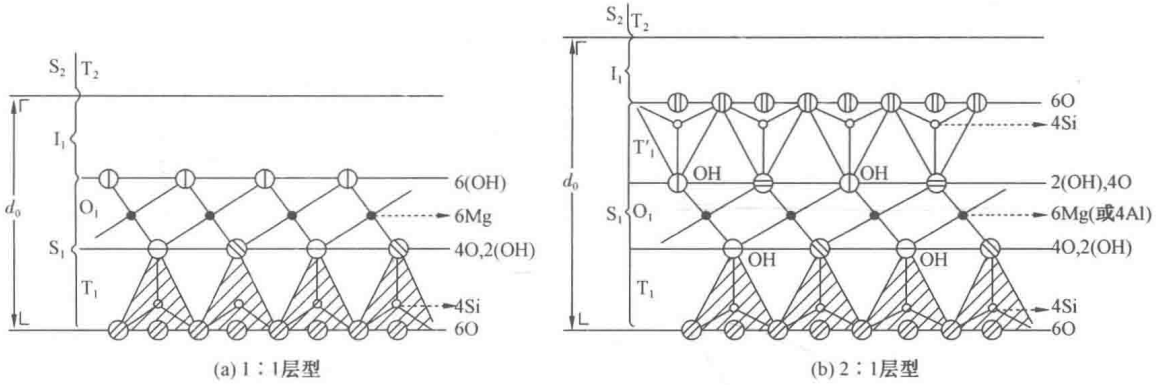


图 1-1-4 1:1层型和 2:1层型的沿 b 轴投影图 (据须藤俊男, 1974)

T_1 、 T_2 —第一、二单位构造层的四面体(片); T'_1 —2:1层型构造层的第二个四面体(片);

O_1 —第一单位构造层的八面体(片); I_1 —第一单位构造层的层间域; S_1 、 S_2 —第一、二单位构造层; d_0 —单位构造高度

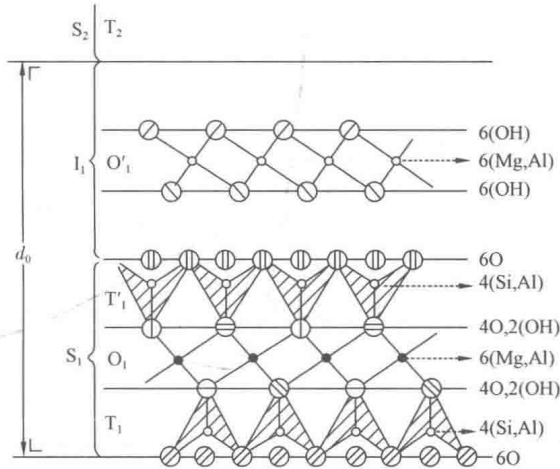


图 1-1-5 绿泥石结构的沿 b 轴投影图 (据须藤俊男, 1974)

T_1 、 T_2 —第一、二单位构造的四面体(片); T'_1 —2:1构造层的第二个四面体(片); I_1 —第一单位构造层的层间域;

O_1 —第一单位构造层的八面体(片); O'_1 —第一单位构造层的层间八面体(片);

S_1 、 S_2 —第一、二单位构造层; d_0 —单位构造高度

(四) 有序—无序和多型

1. 有序—无序

有序—无序是一个结晶学概念。从理论上讲,原子或离子在结晶过程中总是倾向于进入特定的结构位置,形成有序结构,从而最大限度地降低内能,达到最稳定的状态。通常所指的结构有序是长程有序,也就是全部点阵都作有秩序有规律分布。与长程有序相对应的是短程有序,短程有序指的是镶嵌在一个个小区域(晶畴)内的有序结构。结晶过程中的热扰动或晶体的快速生长都会促使原子或离子随机地占据任何可能的结构位置,从而形成无序结构。由于无序结构中的原子或离子是随机地占据任何可能的结构位置,内能大,所以,无序结构是

一种不稳定的结构。有序—无序之间是可以互相转化的。

有序—无序现象在黏土矿物中十分普遍,既存在阳离子替代的有序—无序,也存在晶层重叠的有序—无序。如果各晶层重叠时的位移不一样,就形成无序黏土矿物。不同晶层的相互重叠称间层结构,如果从重叠顺序考虑,则有完全有序、部分有序和无序之分。有序间层是一种整体有序现象,也就是说,在一个单晶体的范围内,不同晶层的有序分布(不同晶层规则交替出现)延伸到整个晶体的全部,从整个晶体范围来看,不同晶层的分布都是有序的。部分有序间层是一种局部有序现象,也就是说,在一个单晶体的范围内,在其晶体的一个局部区域(晶畴)内,不同晶层均呈有序分布,但从整个晶体范围来看,不同晶层的分布则是无序的。无序间层是整个晶体范围内不同晶层的分布都是无序的。

2. 多型

在结晶学上,成分相同的物质在不同物理化学条件下形成不同结构的现像称为同质多象,由此形成的晶体称为该成分的同质多象变体,或称多形。在层状构造硅酸盐中,单元晶层沿 c 轴按不同方式重叠而成的同质多象变体称为多型。多型是一维的狭义多形,是一种特殊类型的多形。

从多型的定义可以看出,对于同一物质的各个多型变体而言,由于它们晶体内部的结构单元层都是相同的,仅是层的堆积顺序和堆积方式(平移和旋转)不同,各变体间在平行于层面的两个方向上,晶胞参数数值必然全都相等或有一定的对应关系;而在垂直层的第三个方向上,各变体的晶胞高度均应等于某一数值的整数倍。例如,迪开石是高岭石的多型,高岭石是一层型,其单位晶胞高度为 $7.2 \times 10^{-1} \text{ nm}$,与结构单元层(单位构造层)高度相等;迪开石是二层型多型变体,其单位晶胞高度为 $14.4 \times 10^{-1} \text{ nm}$,是结构单元层高度的两倍。由于层的堆积顺序和堆积方式不同,同一物质的各个多型变体结构对称性——空间群或晶系也不相同。

常用的多型符号一般是由一个数字和一个字母组成,前面的数字指示单位晶胞内结构单元层的数目,即重复层数,显然,它必定是一个自然数;后面的大写正体字母指示所属的晶系,一般用 M 表示单斜晶系, O 表示四方晶系, T 表示三方晶系, H 表示六方晶系。如果有两个或两个以上的变体属于同一晶系,并且有相等的重复层数时,则在最后再加下标以资区别,如云母的两种单斜晶系的二层型多型变体 $2M_1$ 和 $2M_2$ 。

第二节 黏土矿物的分类与名称

一、黏土矿物及有关层状硅酸盐的分类

黏土矿物分类是人们对黏土矿物研究成果的概括和总结,随着对黏土矿物的不断认识和深入研究,不同时期有不同的分类,这里只简单介绍分类准则和近期的黏土矿物分类表。

(一) 分类准则

黏土矿物可以分为结晶质黏土矿物和非结晶质黏土矿物两个大类,结晶质黏土矿物又有层状构造和层链状构造之分,对于层状构造黏土矿物,目前普遍接受的分类准则是:

(1) 四面体片—八面体片的结合类型(层型,如 1:1 层型、2:1 层型);

- (2)层电荷(x) [$x = \text{层电荷}/\text{O}_{10}(\text{OH})_2$];
- (3)八面体片中的阳离子容量(二八面体的或三八面体的);
- (4)层间物的类型;
- (5)多型(单元晶层的叠积方式);
- (6)化学成分;
- (7)间层黏土矿物组成层的类型;
- (8)间层黏土矿物组成层的叠积性质(有序、无序)。

(二)分类表

国际黏土研究协会(AIPEA)设立命名委员会专门负责黏土矿物分类和命名工作,表1-2-1是该命名委员会1980年公布的国际黏土矿物分类方案简表。随着黏土矿物学资料的丰富及研究的深入和发展,国内外学者又提出了一些黏土矿物及有关层状硅酸盐的分类表(表1-2-2至表1-2-5)。其中表1-2-2是我国许冀泉等(1982)提出的分类方案,列入了与黏土矿物有关的层状硅酸盐矿物,但未列入间(混)层黏土矿物和非晶质黏土矿物,这与1980年国际黏土研究协会的分类方案相同。所不同的是,为了区别于粗粒云母,特将黏粒云母划出,成立水云母族,并将伊利石列入该族。

表1-2-1 1980年公布的国际黏土矿物分类方案简表

层型	单位化学式电荷数	族	亚族	种(举例)
1:1	0	高岭石—蛇纹石	高岭石	高岭石、迪开石、埃洛石
			蛇纹石	纤蛇纹石、鳞蛇纹石、镁绿泥石
2:1	0	叶蜡石—滑石	叶蜡石	叶蜡石
			滑石	滑石
	0.2~0.6	蒙皂石	蒙脱石	蒙脱石、贝得石
			皂石	皂石、锂皂石、锌皂石
	0.6~0.9	蛭石	二八面体	黏粒蛭石
			三八面体	蛭石
	~1	云母 ^①	二八面体	白云母、钠云母
			三八面体	金云母、黑云母、锂云母
	~2	脆云母	二八面体	珍珠云母
			三八面体	绿脆云母、钡铁脆云母
	不定	绿泥石	二八面体	顿绿泥石
			过渡型	锂绿泥石、须藤石
			三八面体	斜绿泥石、鲕绿泥石、镍绿泥石
	~0.1	坡缕石—海泡石	坡缕石	坡缕石
海泡石			海泡石	

① 伊利石(或水云母)、绢云母等的地位不明,暂缺。

表 1-2-2 黏土矿物及有关层状硅酸盐矿物分类表^①

层型	层间物质	族(x = 单位化学式电荷)	亚族	种 ^②	
1:1 Si ₂ O ₅	无或有残留水	高岭石—蛇纹石 $x=0$	二八面体	高岭石、迪开石、珍珠陶石、埃洛石	
			过渡型	铁蛇纹石	
			三八面体	叶蛇纹石、纤蛇纹石、利蛇纹石、镁铝蛇纹石	
2:1 Si ₄ O ₁₀	无	叶蜡石—滑石 $x=0$	二八面体	叶蜡石	
			过渡型	铁滑石	
			三八面体	滑石	
	阳离子或 水化阳离子	蒙皂石 $0.2 < x < 0.6$	二八面体	蒙脱石、贝得石、绿脱石、铬绿脱石	
			过渡型	斯温福石	
			三八面体	皂石、锌皂石、锂皂石、斯蒂文石、脂镍皂石	
			蛭石 $0.6 < x < 0.9$	二八面体	黏粒蛭石
				三八面体	蛭石
				水云母 $0.6 < x < 1.0$	二八面体
		三八面体	水金云母、水黑云母		
		云母 $x=1$	二八面体		白云母、钠云母、钒云母、铬云母
			过渡型	锂云母、铁锂云母	
			三八面体	金云母、黑云母	
		脆云母 $x=2$	二八面体	珍珠云母	
			三八面体	绿脆云母、钡铁云母、锂钡云母	
		氢氧化物	绿泥石 x 不定	二八面体	顿绿泥石、硼锂绿泥石
				过渡型	须藤绿泥石、锂绿泥石
				三八面体	斜绿泥石、叶绿泥石
2:1 Si ₈ O ₂₀ 和 Si ₁₂ O ₂₀	水化阳离子 和沸石水	纤维棒石 x 不定	过渡型	坡缕石、尧弗蒂石	
			三八面体	海泡石	

① 据许冀泉、方郅森(1982);② 举代表性种为例,个别矿物种名有修改。

表 1-2-3 与黏土矿物相关的层状构造硅酸盐矿物分类表(Eric Eslinger 和 David Pevear, 1988)

层型	层间物	族	亚族	矿物种(举例)
1:1	无或仅有 H ₂ O	蛇纹石—高岭石 $x=0$	蛇纹石	纤蛇纹石、利蛇纹石、铁铝蛇纹石
			高岭石	高岭石、迪开石、珍珠石、埃洛石
2:1	无	滑石—叶蜡石 $x=0$	滑石	滑石、镍滑石
			叶蜡石	叶蜡石
	水化可交 换阳离子	蒙皂石 $x=0.2 \sim 0.6$	皂石	皂石、锂皂石、锌皂石、斯蒂文石
			蒙脱石	蒙脱石、贝得石、绿脱石
	水化可交 换阳离子	蛭石 $x=0.6 \sim 0.9$	三八面体蛭石	三八面体蛭石
			二八面体蛭石	二八面体蛭石

续表

层型	层间物	族	亚族	矿物种(举例)
2:1	非水化阳离子	真云母 $x=0.5 \sim 1.0$	三八面体真云母	金云母、黑云母、锂云母、铁云母
			二八面体真云母	白云母、伊利石、海绿石、钠云母、绿磷石
	非水化阳离子	脆云母 $x=2.0$	三八面体脆云母	绿脆云母
			二八面体脆云母	珍珠云母
	氢氧化物	绿泥石 x 不定	三八面体绿泥石	斜绿泥石、鲕绿泥石、镍绿泥石、锰绿泥石
			二八面体绿泥石	顿绿泥石
2:1规则间层	可变	无	无	钠板石、柯绿泥石、滑间皂石、羟硅铝石、绿泥间滑石
变1:1	无	无族名 $x=0$	无亚族名	叶蛇纹石、铁蛇纹石
变2:1	水化可交换阳离子	海泡石—坡缕石 x 不定	海泡石	海泡石、纤钠海泡石
			坡缕石	坡缕石
	可变	无族名 x 不定	无亚族名	铁滑石、黑硬绿泥石、菱硅钾铁石

注: $x = \text{层电荷}/\text{O}_{10}(\text{OH})_2$ 表 1-2-4 平面状含水层状硅酸盐的分类(R. T. Martin *et al.*, 1991)

层型	层间物质 ^①	族	八面体特征	种
1:1	无水或仅有 H_2O ($x=0$)	蛇纹石—高岭石	三八面体	利蛇纹石、铁铝蛇纹石、克铁蛇纹石、镁铝蛇纹石、镍利蛇纹石、锰铝蛇纹石、锌铝蛇纹石、镍铝蛇纹石
			二八面体	高岭石、迪开石、珍珠陶石、埃洛石(平面状)
			二八一三八面体	钛云母
2:1	无水 ($x=0$)	滑石—叶蜡石	三八面体	滑石、镍滑石、杂蛇纹镁皂石(kerolite)、脂镍皂石
			二八面体	叶蜡石、铁叶蜡石
	含水的可交换性阳离子 ($x=0.2 \sim 0.6$)	蒙皂石	三八面体	皂石、锂皂石(hectorite)、锌皂石、斯皂石(stevensite)、锂蒙脱石(swinefordite)
			二八面体	蒙脱石、贝得石、绿脱石、富铬绿脱石(volkonskoite)
	含水的可交换性阳离子 ($x=0.6 \sim 0.9$)	蛭石	三八面体	三八面体蛭石
			二八面体	二八面体蛭石
	不含水的一价阳离子 ($x=0.6 \sim 1.0$)	云母(挠性的)	三八面体	黑云母、金云母、锂云母等
			二八面体	白云母、伊利石、海绿石、绿磷石、钠云母等
	不含水的二价阳离子 ($x=1.8 \sim 2.0$)	脆云母	三八面体	绿脆云母、钡镁脆云母、锂钡脆云母、钡铁脆云母
			二八面体	珍珠云母
氢氧化物片 (x 是可变的)	绿泥石	三八面体	斜绿泥石、鲕绿泥石、锰绿泥石、镍绿泥石、贝利绿泥石(baileychlorite)	
		二八面体	顿绿泥石	
		二八一三八面体	锂绿泥石、须藤绿泥石(sudoite)	

续表

层型	层间物质 ^①	族	八面体特征	种
2:1	不同 ($x = \text{可变的}$)	规则间层	三八面体	柯绿泥石 (corrensite)、滑间皂石 (alietite)、水黑云母 (hydrobiotite)、绿泥间滑石 (kulkeite)
			二八面体	累托石 (rectorite)、托苏石 (tosudite)

① 每单位化学式的净层电荷。

表 1-2-5 非平面状含水层状硅酸盐的分类 (据 R. T. Martin *et al.*, 1991)

层型	调制组分	连结构型	单元层 ($c \sin \beta$) $\times 10^{-1} \text{ nm}$	传统隶属关系	种	
a. 调制结构	1:1	四面体片	链状	7	蛇纹石	叶蛇纹石、蜡硅锰矿
		岛状	7	蛇纹石	铁蛇纹石、肾硅锰矿、热臭石、锰热臭石、铁热臭石、热臭石-3R、热臭石-12R、砷硅锰矿、nelenite	
		其他		无	无	
	2:1	四面体片	链状	9.5	滑石	铁滑石
				12.5	云母	辉叶石、eggletonite
			岛状	9.6 ~ 12.5	云母/复合	菱硅钾铁石、红硅锰矿、黑硬绿泥石、低铁黑硬绿泥石、lennilenaite
			其他	12.3	无	班硅锰石
			14	绿泥石	富锰绿泥石	
	八面体片	链状	12.7 ~ 13.4	辉闪石类 (pyribole)	海泡石、纤钠海泡石、镍海泡石、坡缕石、锰坡缕石	
	b. 卷曲和球状结构	1:1	无	三八面体	—	蛇纹石
			二八面体	—	高岭石	埃洛石 (非平面状)

1991年,国际黏土研究协会名词术语委员会提出了“关于修订粘土矿物分类的报告”(R. T. Martin等,1991)。与以往黏土矿物分类表的最大区别是:分类时首先考虑黏土层状结构的基本特征,将其划分为“平面状的(planar)”和“非平面状的(non-planar)”含水层状硅酸盐两类。前者指四面体片顶角朝向一致的简单层状结构,后者指四面体片顶角朝向不一致而产生的具周期性颠倒的调制结构(如叶蛇纹石、海泡石等)以及管状或球状结构(如埃洛石、纤蛇纹石等)。从表1-2-4和表1-2-5可以看出,表中囊括了除非晶质黏土矿物外的主要黏土矿物种,规则间层黏土矿物以及伊利石等都在其内,但是也包括了不少通常不属于黏土矿物的含水层状硅酸盐矿物(杨雅秀等,1994)。

二、黏土矿物的名称

人们在长期生产实践中,发现和利用了各种不同的黏土矿物,为了区分和认识这些不同的矿物,对每种矿物都曾给予了一定的名称。随着分析研究手段的进一步改进和研究工作的深入,一些已有的名称,或被进一步完善,或被重新定义,或被否定是很自然的,所以应该尽量避